PHYTORESTAURATION DE SOL CONTAMINÉ PAR DU PLOMB ET DU CUIVRE À FARNHAM, QUÉBEC

ESSAIS EN SERRE ET ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

RAPPORT FINAL

(N/Réf. : EC9045)

PRÉSENTÉ À

ENVIRONNEMENT CANADA

ET AU

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE NATIONALE

Mai 2000

Biogenie

COPIE

SPECIALISTES EN ENVIRONNEMENT

QUÉBEC (siège social)
350, rue Franquet
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

MONTRÉAL
12672, boulevard Industriel
Pointe-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

PHYTORESTAURATION DE SOL CONTAMINÉ PAR DU PLOMB ET DU CUIVRE À FARNHAM, QUÉBEC

ESSAIS EN SERRE ET ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

RAPPORT FINAL

(N/Réf. : EC9045)

Préparé par :

Gervais Lessard, biol.
Technicien senior

Vérifié et approuvé par :

Yvan Pouliot, biol. M.Sc.
Directeur de projets

Mai 2000

102-01307/

AVIS

Le présent rapport a été examiné par la Direction de la Protection d'Environnement Canada qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marques de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

RÉSUMÉ

Ce projet visait à évaluer la faisabilité technico-économique de la phytorestauration pour réhabiliter des sols contaminés au plomb et au cuivre, entreposés dans une cellule sur le terrain de la Garnison de l'Estrie des Forces canadiennes à Farnham. Plus précisément, l'objectif général consistait à trouver un moyen écologique pour ramener la concentration du plomb et du cuivre de la couche superficielle de sol (0,0 à 0,8 m, c'est à dire environ 1 556 m^3 de sol), sous le critère «C» de la «*Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*» du ministère de l'Environnement (MENV) (ci-après appelée «la Politique» : 1 000 mg/kg pour le plomb et 500 mg/kg pour le cuivre).

La phytorestauration est une technique biologique qui utilise les plantes vasculaires (arbres, arbustes ou plantes herbacées) pour réhabiliter, stabiliser ou extraire les contaminants organiques ou inorganiques dans le sol, l'eau ou les sédiments.

Les objectifs spécifiques au projet à l'étude étaient les suivants :

1. faire un essai avec des intrants susceptibles de favoriser la croissance optimale de plantes pouvant accumuler des métaux dans leurs tissus. Pour ce faire, les paramètres suivants ont été évalués :
   - 2 agents chélateurs, soit l'acide citrique et le «*Ethylene Diamine Tetraacetic Acid*» (EDTA), en vue d'extraire le plomb et le cuivre du sol;
   - 2 plantes pouvant accumuler des métaux et produire une biomasse aérienne importante. Il s'agit de la moutarde indienne (*Brassica juncea*) et du maïs (*Zea mays*);
   - ajout de fertilisants (azote, phosphore et potassium) dans le but de favoriser la croissance optimale des plantes dans le sol (loam sableux).

2. évaluer la faisabilité technique de la phytorestauration du sol confiné dans la cellule de Farnham à partir des résultats obtenus lors d'essais en serre. Il s'agissait de réduire les teneurs en plomb (1 200 mg/kg initialement) sous le critère «C» de la Politique du MENV, le cuivre (165 mg/kg initialement) se situant déjà sous ce critère;

3. estimer les coûts de la phytorestauration et de la durée de la décontamination permettant d'atteindre le critère «C» de la Politique.

Selon les résultats initiaux des analyses de sol, il faut abaisser d'au moins 200 mg/kg de sol la teneur en plomb pour atteindre l'objectif de décontamination pour ce métal. À la lumière des résultats obtenus, le meilleur rendement a été obtenu avec *Brassica juncea* et le EDTA (3,0 g/kg de sol) comme agent chélatant. Le taux d'extraction du plomb correspond dans ce cas à 5,55 mg/kg de sol. Il faudrait donc 36 récoltes pour atteindre les objectifs visés, travaux qui s'étendraient alors sur 18 années, puisqu'il semble possible d'obtenir annuellement 2 récoltes avec la moutarde.

Le coût du EDTA à lui seul implique un déboursé de 25 $ la tonne de sol à traiter, et son application doit être répétée à chaque récolte. La phytorestauration ne semble donc pas constituer, à elle seule, une avenue réaliste pour la réhabilitation des sols de Farnham. Il pourrait être envisageable de combiner cette technologie avec une autre, par exemple en tirant profit du fait que les sols sont confinés dans une cellule étanche et en récupérant le lixiviat et les métaux qui y seraient solubilisés.

Les coûts et le temps de traitement très élevés comparativement à d'autres moyens de réhabilitation défavorisent grandement la phytorestauration par rapport aux autres technologies usuelles telle que la mise en cellule sécuritaire et empêchent de la recommander comme approche unique pour décontaminer les sols de la cellule de Farnham.

SUMMARY

This project has evaluated the technico-economic feasibility of the phytoremediation to restore a soil stored in a confined cell at the Garrison of Estrie of the Canadian Forces located at Farnham. This soil is contaminated with lead and copper More precisely, the general objective was to find an ecological way to reduce the lead and copper concentrations of the upper layer of soil (0,0 to 0,8 m, i.e. approximately 1 556 m^3 of soil), under the criterion «C» of the «*Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*» of the «Ministère de.l'Environnement (MENV) (hereafter call «the Policy» (1 000 mg/kg for lead and 500 mg/kg for copper).

The phytorestauration is a biological technique which uses the vascular plants (trees, shrubs or herbaceous plants) to decontaminate, stabilize or extract the organic or inorganic contaminants in the soil, water or the sediments.

The objectives specific to the project being studied were the following:

1. to carry out a test with intrants likely to support an optimal growth of plants being able to accumulate metals in their tissues. With this intention, the following parameters were evaluated:
   - 2 chelating agents, citric acid and Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA), in order to extract lead and copper from the soil;
   - 2 plants being able to accumulate metals and to produce a significant aerial biomass : Indian mustard (*Brassica juncea*) and corn (*Zea mays*);
   - addition of fertilizers (nitrogen, phosphorus and potassium) with an aim of supporting the optimal growth of the plants in the soil (sandy loam).

2. to evaluate the technical feasibility of the phytoremediation of the soil confined in the cell of Farnham based on the results obtained during the greenhouse assays. The goal was to reduce the lead content (initially 1 200 mg/kg) under the criterion «C» of the MENV Policy, copper (165 mg/kg initially) being located already under this criterion;

3. to estimate the costs of the phytoremediation and the duration of decontamination allowing to reach the criterion «C» of the Policy.

According to initial soil analyses, it is necessary to reduce by at least 200 mg/kg the lead content of the soil to achieve the goal of decontamination for this metal. In the light of the results obtained, the best result was obtained with *Brassica juncea* and EDTA (3,0 g/kg of soil) as chelating agent. The extraction rate corresponds in this case to 5,55 mg of lead by kg of soil treated. It thus would require 36 harvests to achieve the pursued goals; work which would extend then over 18 years, since it seems possible to obtain annually 2 harvests with mustard.

The economics of the process must consider the cost of EDTA of 25$/ton of soil to be treated, which must be applied with each harvest. The phytoremediation thus does not seem to constitute, alone, a realistic avenue for the rehabilitation of the contaminated soil at Farnham. It could be possible to combine this technology with another by taking advantage of the facts that the soil is confined in a tight cell and that the leachate and metals solubilized in it could be recovered.

Phytoremediation is disadvantaged by its very high costs and treatment time compared to other techniques of rehabilitation such as secure landfill. Thus, this technique is not recommended as the unique approach to decontaminate the soils of the Farnham confined cell.

TABLE DES MATIÈRES

page

RÉSUMÉ

1 INTRODUCTION 1

2 HISTORIQUE DU SITE ET PROBLÉMATIQUE 2
2.1 Historique de la contamination 2
2.2 Caractérisation 2
2.3 Entreposage des sols contaminés dans la cellule de confinement 4
2.4 Problématique 4

3 BUT ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES 5
3.1 Description du procédé de traitement par phytorestauration 5
3.2 Méthodologie de réhabilitation 6
3.3 Objectifs spécifiques au projet de Farnham 8

4 PROTOCOLE CHOISI POUR LES ESSAIS DE PHYTORESTAURATION EN SERRE 10

5 TRAVAUX RÉALISÉS 13
5.1 Chronologie des travaux 13
5.2 Fertilisation et amendement des sols 15
5.3 Détermination des doses d'acide citrique et de EDTA 17

6 RÉSULTATS 19
6.1 Observations générales sur la croissance des plantes 19
6.2 Phytoextraction de plomb et de cuivre 19

7 DISCUSSION 23
7.1 Constatations générales 23
7.2 Évaluation du coût du traitement 24

8 RECOMMANDATIONS 26

9 RÉFÉRENCES CITÉES 27

LISTE DES TABLEAUX

page

Tableau I : Critères génériques pour les sols 3

Tableau II : Résultats des analyses sur les sols 11

Tableau III : Chronologie des activités relatives aux essais en serre 14

Tableau IV : Détermination des doses de fertilisants 16

Tableau V : Quantités d'engrais utilisées 17

Tableau VI : Doses d'acide citrique 18

Tableau VII : Description des doses de chélates utilisées pour les essais 18

Tableau VIII : Identification des différents échantillons 20

Tableau IX : Cuivre et plomb mesurés dans *Brassica juncea* 21

Tableau X : Cuivre et plomb mesurés dans *Zea mays* 22

Tableau XI : Coûts annuels de traitement avec 2 récoltes de moutarde 25

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Certificats d'analyse

ANNEXE B Résultats de Ruby Beil (1998)

ANNEXE C Montage photographique

1 INTRODUCTION

L'utilisation dans le passé de cartouches munies de balles de plomb et de cuivre lors des exercices de tir à la Base de l'Armée canadienne située à Farnham dans les Cantons de l'Est, a occasionné la contamination, par ces métaux, des sols servant de barrière aux projectiles. Ces sols ont par la suite été entreposés dans une cellule de confinement étanche. Dans le but de réduire les concentrations de plomb et de cuivre de ces sols, le ministère de la Défense nationale a lancé un projet de recherche de phytorestauration. Le projet actuel est réalisé dans le cadre de l'entente de collaboration scientifique conclue en août 1998 entre Environnement Canada, l'Université Laval et Biogénie S.R.D.C. inc. (ci-après appelée « Biogénie »).

Les personnes suivantes ont collaboré à ce projet :

- M. Didier Barré, Construction de défense Canada;
- D[r] Antoine Karam, Université Laval;
- Mme Lucie Olivier, Environnement Canada;
- M. Frédéric Shooner, Environnement Canada;
- M. Yvan Pouliot, Biogénie;
- M. Nicolas Moreau, Biogénie; et
- M. Gervais Lessard, Biogénie.

2 HISTORIQUE DU SITE ET PROBLÉMATIQUE

2.1 HISTORIQUE DE LA CONTAMINATION

L'ancien champ de tir d'où proviennent les sols contaminés est localisé au centre du terrain de la Garnison de l'Estrie à Farnham. Ce champ de tir a été utilisé depuis le début des années 1940 jusqu'à la fin de 1996 pour l'entraînement des militaires, notamment au tir à la carabine sur des cibles fixes. Au cours des années d'usage du site, le sol composant les buttes d'arrêt a été contaminé par les fragments de projectiles constitués de plomb et de cuivre.

Selon la description fournie dans le rapport de la firme Sanexen (1998), la surface de ces buttes d'arrêt a été remaniée plusieurs fois, à l'aide de bouteurs, dans le but de ralentir l'érosion. Également, des couches de remblai ont été ajoutées au cours des années.

2.2 CARACTÉRISATION

Avant les travaux d'excavation et de confinement exécutés par Sanexen en 1998, 3 études de caractérisation environnementale ont été réalisées. Les analyses effectuées lors de ces études ont servi à classifier les sols selon les critères génériques de la « *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* » du ministère de l'Environnement (MENV) (1999) (ci-après appelée « la Politique ») en ce qui a trait à leur degré de contamination en cuivre et en plomb. Ces niveaux et les concentrations correspondantes pour ces paramètres sont présentés au tableau I.

Tableau I : Critères génériques pour les sols

Métal	Critères de sol (mg/kg matière sèche)		
	A[1]	B[2]	C[3]
Plomb	50	500	1 000
Cuivre	40	100	500

1 : Teneurs de fond pour les paramètres inorganiques et limite de quantification pour les paramètres organiques. La limite de quantification est définie comme la concentration minimale qui peut être quantifiée à l'aide d'une méthode d'analyse avec une fiabilité définie.

2 : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle, récréative ou institutionnelle. Sont également inclus les terrains à vocation commerciale situés dans un secteur résidentiel. L'usage institutionnel regroupe les utilisations telles que les hôpitaux, les écoles et les garderies. L'usage récréatif regroupe un grand nombre de cas possibles qui présentent différentes sensibilités. Ainsi, les usages sensibles, comme les terrains de jeux, devront être gérés en fonction du niveau « B ». Pour leur part, les usages récréatifs considérés moins sensibles comme les pistes cyclables peuvent être associés au niveau « C ».

3 : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation commerciale, non situés dans un secteur résidentiel, et pour des terrains à usage industriel.

L'étude menée par le Groupe Cartier en 1995 ne comportait que 4 échantillons de sol prélevés des buttes d'arrêt sur une profondeur de 0,6 mètre. Les résultats analytiques indiquaient des concentrations en plomb et en cuivre inférieures au niveau « B » de la Politique. Cependant, les observations visuelles signalaient la présence de nombreux fragments de projectiles dans le sol sablonneux de ces buttes d'arrêt.

En 1996, SM Environnement a effectué 46 sondages à la tarière manuelle dans les 2 buttes d'arrêt. Les sondages étaient d'une profondeur moyenne de 1,1 mètre, variant de 0,5 à 4,1 mètres. À la lumière des résultats analytiques obtenus, les sols des buttes d'arrêt étaient contaminés par du plomb et du cuivre à des concentrations dépassant le niveau « B » de la Politique du MENV et ce, jusqu'à une profondeur de 2,2 mètres.

La seconde étude de SM Environnement réalisée en 1998 démontrait, grâce aux échantillons prélevés dans 26 tranchées d'exploration, que les sols contenaient une grande quantité de fragments de balles. Les essais de tamisage ont montré que la plus grande partie de ces fragments mesurait entre 5 et 10 mm. Il a été évalué alors que le volume des sols dépassant le niveau « C » pour le plomb et/ou le cuivre totalisait 1 850 m^3.

2.3 ENTREPOSAGE DES SOLS CONTAMINÉS DANS LA CELLULE DE CONFINEMENT

Les travaux d'excavation des sols, d'aménagement de la cellule de confinement et d'entreposage des sols contaminés ségrégués dans cette cellule ont été exécutés par Sanexen en 1998. Au total, 4 790 m^3 de sol contaminé au plomb et au cuivre ont été gérés. Ces sols ont été tamisés à 5 mm et à 10 mm. La fraction comprise entre 5 et 10 mm, où se trouve la plus grande proportion de fragments de balles, a été disposée au site d'enfouissement Cintec à Ville Lasalle.

Le reste des sols se divisait comme suit :

- 562 m^3 (12,7 %) de sol dont les concentrations sont inférieures au niveau « B »;
- 2 302 m^3 (52,0 %) de sol dont les concentrations se situent dans la plage « B-C »;
- 1 556 m^3 (35,2 %) de sol dont les concentrations sont supérieures au niveau « C ».

Les sols se situant dans la plage « B-C » ont été placés dans le fond de la cellule et occupent la presque totalité de celle-ci, sur une épaisseur de 1,5 mètre. Les sols de granulométrie supérieure à 10 mm, où se retrouve une certaine quantité de fragments de balles, ont été disposés à l'extrémité ouest de la cellule. Les sols les plus contaminés (« >C ») forment une couche de 0,3 à 0,8 mètre sur la partie supérieure de la cellule, qui est recouverte d'une membrane étanche. Cette cellule mesure en moyenne 97 mètres de longueur sur 21 mètres de largeur.

2.4 PROBLÉMATIQUE

La présence de cette cellule sur la Base limite les activités d'entraînement des militaires. C'est pourquoi il a été décidé de réduire les concentrations de plomb et de cuivre des sols qui y sont entreposés. Cela permettra, grâce au reclassement des sols, d'en faciliter la disposition et de procéder au démantèlement de la cellule.

3 BUT ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Le but de ce projet consiste à évaluer la faisabilité technico-économique de décontaminer, par phytorestauration, le sol contaminé par du plomb et du cuivre confiné dans la cellule de Farnham, qui mesure 97 mètres de longueur sur 21 mètres de largeur sur 1,5 mètre de profondeur. Plus précisément, le but est de trouver un moyen écologique pour ramener la concentration du plomb et du cuivre de la couche superficielle de sol (0,0 à 0,8 m) sous le critère « C » de la Politique du MENV.

3.1 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT PAR PHYTORESTAURATION

Les principaux procédés usuels utilisés présentement pour la réhabilitation de sites contaminés par des métaux lourds relèvent de technologies physico-chimiques. On retrouve, entre autres, le traitement chimique, le lessivage des sols, la vitrification, les divers traitements thermiques, le traitement électro-cinétique, l'excavation et le confinement (« dig and dump »).

La phytorestauration, qui constitue un procédé biologique, fait exception à cette règle. En effet, la phytorestauration est une technologie qui utilise les plantes vasculaires (arbres, arbustes ou plantes herbacées) pour réhabiliter, stabiliser ou extraire les contaminants organiques ou inorganiques dans le sol, l'eau et les sédiments.

Selon le type de contaminant, le milieu affecté et le moyen utilisé par la plante pour réduire ou contrôler la contamination, la phytorestauration a été divisée en 6 types différents : la phytoaccumulation, la phytodégradation, la phytostabilisation, la phytovolatilisation, la rhizodégradation et la rhizofiltration (ITRC, 1999).

La phytoaccumulation, aussi appelée phytoextraction, fait référence à l'absorption et au transport des contaminants métalliques dans le sol par les racines jusqu'aux parties aériennes de la plante. Certaines plantes, qui possèdent des propriétés hyperaccumulatrices, peuvent absorber de très grandes quantités de métaux en comparaison à d'autres plantes et également par rapport aux concentrations ambiantes dans le sol. Ces plantes sont sélectionnées et plantées sur le site à réhabiliter en fonction des métaux présents et des autres conditions du site. À la fin de la croissance des plantes, qui peut s'étendre sur plusieurs semaines ou sur plusieurs mois, celles-ci sont récoltées.

L'enfouissement, l'incinération et le compostage sont les options disponibles pour la disposition ou le recyclage de la biomasse végétale et des métaux extraits du sol. L'ensemencement et la récolte peuvent être répétés, si nécessaire, pour atteindre les objectifs de décontamination. Les analyses sur les tissus végétaux récoltés (tiges, feuilles, racines, etc.) déterminent leur usage final.

L'efficacité de la phytorestauration est étroitement liée à la disponibilité des métaux par la plante utilisée. Or, comme la principale caractéristique des plantes hyperaccumulatrices est leur capacité de synthétiser des substances qui peuvent solubiliser les métaux dans la rhizosphère, la possibilité de reproduire artificiellement ces conditions a été envisagée dans le cas de la présente étude. Des études sur la phytoextraction du plomb (Huang *et al.*, 1997 a et b) ont clairement démontré que l'utilisation d'agents chélateurs artificiels comme le « *Ethylene Diamine Tetraacetic Acid* » (EDTA) a permis d'accroître la concentration en plomb de moins de 500 mg/kg à plus de 10 000 mg/kg dans les tissus des plantes étudiées.

Le pH du sol est également un facteur important à considérer parce qu'il contrôle la solubilité des métaux dans le sol. Il a été démontré que le fait de diminuer le pH entraîne une diminution de l'adsorption des métaux sur les particules de sol et augmente, par le fait même, leur solubilité et leur disponibilité pour les plantes.

3.2 MÉTHODOLOGIE DE RÉHABILITATION

Comme pour les autres technologies de réhabilitation de sites, la phytorestauration d'un site contaminé par des métaux exige une étude approfondie avant de passer à l'étape de la réalisation. Le design du système de phytorestauration variera en fonction des contaminants, des conditions rencontrées sur le site, des objectifs de décontamination, des plantes utilisées et des intrants nécessaires à la réussite du projet. De façon générale, les étapes suivantes font partie intégrante de la méthodologie de réhabilitation:

- ***La caractérisation***

La caractérisation permet l'identification et la détermination de la concentration des contaminants. Elle permet aussi de cerner l'étendue et la profondeur de la contamination.

➢ ***Le choix des plantes***

Le choix de l'espèce ou des espèces se fait en fonction du contaminant et des caractéristiques physiques du sol à traiter.

➢ ***Les essais de traitabilité***

Les essais de traitabilité, qui ont généralement lieu en serre, permettent de déterminer à l'avance la possibilité d'atteindre les objectifs. Ils servent également à évaluer la durée totale du traitement.

➢ ***La détermination des intrants (irrigation, fertilisants et chélates)***

Les analyses de sol effectuées préalablement aux essais en serre servent à déterminer les fertilisants à incorporer au sol, l'irrigation nécessaire et le choix des chélates qui permettront de solubiliser les contaminants.

➢ ***Le captage de l'eau souterraine***

Cette opération devra être envisagée dans le cas où la migration des contaminants dans l'eau souterraine pourrait être provoquée par l'irrigation ou l'ajout des chélates pendant le traitement. Il s'agit de pomper l'eau en aval du site contaminé et de la faire recirculer dans le système d'irrigation, ou encore d'installer une membrane étanche sous les sols à réhabiliter.

➢ ***La mesure du taux de décontamination***

Le taux de décontamination est mesuré lors des essais en serre de même que lors de la première saison sur le terrain. Ces mesures permettent de déterminer la durée de la réhabilitation.

➢ ***La préparation du terrain et l'ensemencement***

Le terrain est préparé de la même façon que s'il s'agissait d'une production agricole. La même machinerie et les mêmes méthodes sont utilisées.

➢ ***Le suivi***

Il est nécessaire de suivre la croissance des plants afin de pouvoir réagir rapidement à toute carence nutritive ou à des attaques par des insectes ou des maladies. Il faut également procéder, au besoin, à l'irrigation des plants.

➢ ***La récolte***

Les plants sont récoltés en entier (racines et parties aériennes) lorsque cela est possible. Cependant, pour la plupart des espèces utilisées, seulement la partie aérienne est récoltée.

➢ ***La gestion des plants récoltés***

Les plants récoltés doivent être analysés afin de déterminer leur concentration en contaminants et conséquemment leur mode de gestion. Si le procédé fonctionne bien, ils ont généralement des teneurs en métaux suffisamment élevées pour qu'ils soient considérés comme des matières dangereuses. Afin de minimiser les coûts de disposition, il est important d'en réduire la masse et le volume, et ce, par séchage ou incinération.

3.3 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES AU PROJET DE FARNHAM

Les objectifs spécifiques au projet à l'étude sont les suivants :

1) faire un essai avec des intrants susceptibles de favoriser une croissance optimale de plantes pouvant accumuler des métaux dans leurs tissus. Pour ce faire, les paramètres suivants ont été évalués :
    - 2 agents chélateurs, soit l'acide citrique et le EDTA, en vue d'extraire le plomb et le cuivre du sol;
    - 2 plantes pouvant accumuler des métaux et produire une biomasse aérienne importante. Il s'agit de la moutarde indienne et du maïs;
    - ajout de fertilisants (azote, phosphore et potassium) et un amendement organique dans le but de favoriser la croissance optimale des plants dans le sol sablonneux;

2) évaluer la faisabilité technique de la phytorestauration du sol confiné dans la cellule de Farnham à partir des résultats obtenus lors des essais en serre. Il faudra alors élaborer un échéancier de projet de décontamination de l'ensemble de la cellule afin de réduire les teneurs en plomb (1,100 mg/kg initialement) sous le niveau « C » de la Politique du MENV, le cuivre (165 mg/kg initialement) se situant déjà sous ce critère;

3) estimer les coûts de la phytorestauration et de la durée de la décontamination permettant d'atteindre le niveau « C » de la Politique.

4 PROTOCOLE CHOISI POUR LES ESSAIS DE PHYTORESTAURATION EN SERRE

Le protocole retenu pour les essais de phytorestauration dans le cadre du présent projet comprend les éléments suivants :

- 2 espèces de plantes : la moutarde indienne (*Brassica juncea*) et le maïs (*Zea mays*), variété 4066 pour l'ensilage;
- agent chélateur : acide citrique (2 doses : 0,8 et 1,6 g/kg de sol), un témoin négatif (aucun ajout de chélate) et un témoin positif (EDTA : 3,0 g/kg de sol);
- culture des plants dans des chaudières de 22 litres, à raison de 6 plants par chaudière pour la moutarde et 2 plants par chaudière pour le maïs;
- essais en duplicata pour la moutarde et en triplicata pour le maïs.

Les essais nécessitent donc 20 chaudières *(1 espèce x 4 chélates (2 doses + 2 témoins) x 2 duplicatas et 1 espèce x 4 chélates x 3 triplicatas)*, pour un total de 48 plants de moutarde indienne et 24 plants de maïs.

Les espèces ont été choisies en fonction de leur efficacité reconnue comme accumulatrices de quelques métaux (McIntyre, 1999) et de l'importance de leur biomasse. Ce choix fait suite à une revue de littérature et à des essais antérieurs sur des sols provenant de l'Île-aux-Corbeaux (Olivier *et al,* 1999). Des recherches visant à identifier des espèces vivaces ayant des capacités reconnues à accumuler des métaux lourds se sont avérées infructueuses[1]. Il faut noter que l'utilisation d'une espèce vivace permet de minimiser les opérations d'ensemencement et de récolte, et en conséquence, les coûts.

Lorsque la phytoextraction des métaux est envisagée, le docteur Antoine Karam suggère l'utilisation de l'acide citrique, qui est un acide organique, comme agent de solubilisation de certains métaux dans le sol, ce qui pourra les rendre disponibles pour les plants avant leur récolte. Bien que l'acide citrique forme des chélates de métaux qui ont une stabilité généralement plus faible que celle de EDTA-métaux, elle pourrait constituer une alternative plus économique que le EDTA.

[1] Une revue bibliographique d'environ 1 500 publications scientifiques a été effectuée sur le domaine de la phytorestauration.

Les échantillons de sol prélevés à Farnham ont été analysés pour les paramètres suivants : azote disponible et azote total (N), phosphate assimilable (P), potassium (K), plomb (Pb), cuivre (Cu), pH et carbone organique total (COT). Les résultats sont fournis au tableau II et les certificats d'analyse sont disponibles à l'annexe A. Le sol recueilli ne contenant que 0,22 % de carbone organique total (0,34 % de matière organique) a été amendé avec du compost pour élever le pourcentage de matière organique à environ 3 % (poids/poids). Selon une observation visuelle, les sols peuvent être décrits comme étant sablonneux. Des engrais minéraux (azote, phosphore et potassium) ont également été ajoutés, selon les recommandations relatives au maïs, du guide de fertilisation de l'Association des fabricants d'engrais du Québec.

Tableau II : Résultats des analyses sur les sols

	Plomb (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	N* (mg/kg)	P** (mg/kg)	K (mg/kg)	COT*** %C	pH
Initial							
Échantillon no 1	1 000	150					6,1
Échantillon no 2	1 200	180					6,0
Moyenne	1 100	165	10,3	180	177	0,22	6,1
Final							
Maïs (témoin)	1 300	260					5,8
Maïs (EDTA), dessus	280	80					7,0
Maïs (EDTA), fond	640	120	<3	150			
Maïs (Acide citrique, X1)	800	120					5,3
Maïs (Acide citrique, X2)	760	130					5,4
Moutarde (témoin)	1 000	170					6,4
Moutarde (EDTA), dessus	360	100					8,0
Moutarde (EDTA), fond	1 200	150	9	210			
Moutarde (Acide citrique, X1)	880	140					5,8
Moutarde (Acide citrique, X2)	960	140					5,2

* Azote disponible soluble
** Phosphate assimilable
*** Carbone organique total

S/P/EC/9045/Result-sols.xls

Note : Les analyses initiales visant à déterminer les teneurs en azote, phosphore, potassium et carbone organique total ont été effectuées sur les sols prélevés le 21 septembre 2000.

Les plants ont été éclairés par des lampes au sodium, selon un cycle de 14 heures de jour et 10 heures de nuit et ils ont été arrosés au besoin (4 à 5 fois par semaine).

La récolte a été effectuée à la mi-janvier 2000, après 9 semaines de croissance dans le cas de la moutarde indienne, et à la fin de janvier, après 11 semaines de croissance pour le maïs. La partie aérienne des plants a été pesée (pour établir son poids sec) et analysée pour mesurer les concentrations en plomb et en cuivre, afin de déterminer les quantités de ces métaux extraites des sols. Les racines de moutarde ont aussi été récoltées pour être pesées et analysées pour les mêmes paramètres. Les racines de maïs, qui sont extrêmement difficiles à extraire du sol, n'ont pas été récoltées.

Dans tous les cas, un test de germination a été fait après la récolte pour vérifier que le milieu n'a pas été rendu toxique à la suite de l'ajout du chélateur. Tous les plants ont été coupés en morceaux d'environ 5 cm et séchés, à 80o C, pendant une période de 72 heures. Tous les échantillons ont été pesés puis pulvérisés (broyés puis tamisés) à 2 mm avant d'être analysés.

5 TRAVAUX RÉALISÉS

5.1 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

Les activités réalisées à ce jour sont résumées au tableau III. Il est à noter que le prélèvement de sol, effectué le 21 septembre 1999, a dû être repris puisque les concentrations de plomb et de cuivre mesurées dans ces sols étaient inférieures au critère « C » de la Politique du MENV. Le but du projet étant de démontrer qu'il est possible de réduire les concentrations de ces paramètres sous le critère « C », il était donc nécessaire de réaliser les essais avec des sols dont le degré de contamination était supérieur à ce niveau. Un second prélèvement de 20 chaudières de 22 litres de sol a donc été effectué le 27 octobre 1999. Les résultats d'analyse sur ces sols sont présentés au tableau II.

On a ajouté aux 2 espèces une seule dose de EDTA (3 g/kg de sol) et 2 doses d'acide citrique (0,8 et 1,6 g/kg de sol). Ces 2 dernières doses ont été divisées en 2 et la première moitié a été appliquée 2 semaines avant la récolte et la deuxième moitié, une semaine avant la récolte.

Tableau III : Chronologie des activités relatives aux essais en serre

Date	Activité	Commentaire
8 septembre 1999	Réunion de démarrage	Personnes présentes : A. Karam, L. Olivier, F. Shooner, N. Moreau, G. Lessard
20 septembre 1999	Réservation de la serre	Serres de l'Université Laval (jusqu'en janvier 2000)
21 septembre 1999	Visite du site (à Farnham) et prélèvement de sol	Personnes présentes : A. Karam, L. Olivier, F. Shooner, D. Bradshaw, G. Lessard. Prélèvement de 20 chaudières de 20 litres
12 octobre 1999	Rédaction du protocole des essais en serre	
27 octobre 1999	Prélèvement supplémentaire de sol à Farnham	Un nouveau prélèvement a dû être effectué, car le sol prélevé le 21 septembre affichait un degré de contamination trop faible pour les besoins de l'étude en cours
1er novembre 1999	Préparation des sols	Ajout de fertilisants et amendement organique
12 novembre 1999	Ensemencement	Maïs : 4 graines par chaudière Moutarde : 10 à 12 graines par chaudière
26 novembre 1999	Éclaircissement des plants de maïs	2 plants par chaudière
14 décembre 1999	Visite de la serre Éclaircissement des plants de moutarde	Personnes présentes : A. Karam, L. Olivier, Y. Pouliot, G. Lessard 6 plants par chaudière
4 janvier 2000	Enlèvement des tables Second ajout de fertilisants aux plants de maïs	Les plants étant trop hauts, ceux-ci risquaient d'être brûlés par les lampes au sodium. Les chaudières ont donc été déposées directement sur le sol.
5 janvier 2000	Ajout de la première moitié des 2 doses d'acide citrique aux plants de moutarde Ajout de la dose complète de EDTA aux plants de moutarde	Doses ajoutées : 0,4 g/kg et 0,8 g/kg de sol Dose ajoutée : 3 g/kg de sol
10 janvier 2000	Visite à la serre	Les plants de moutarde qui ont reçu une dose de EDTA sont desséchés
12 janvier 2000	Ajout de la deuxième moitié des 2 doses d'acide citrique aux plants de moutarde	Doses ajoutées : 0,4 g/kg et 0,8 g/kg de sol

Tableau III : Chronologie des activités relatives aux essais en serre (suite)

Date	Activité	Commentaire
21 janvier 2000	Ajout de la première moitié des 2 doses d'acide citrique aux plants de maïs Ajout de la dose complète de EDTA aux plants de maïs	Doses ajoutées : 0,4 g/kg et 0,8 g/kg de sol Dose ajoutée : 3 g/kg de sol
25 janvier 2000	Visite à la serre	Les plants de maïs qui ont reçu une dose de EDTA sont desséchés
28 janvier 2000	Ajout de la deuxième moitié des 2 doses d'acide citrique aux plants de maïs	Doses ajoutées : 0,4 g/kg et 0,8 g/kg de sol
3 février 2000	Récolte des plants de maïs Échantillonnage des sols	Seulement les parties aériennes, coupées en morceaux d'environ 5 cm pour séchage
28 février au 2 mars 2000	Pulvérisation à 2 mm de tous les plants	Chaque échantillon a été pesé lors de cette étape
16 mars 2000	Réunion préliminaire à la rédaction du rapport	Personnes présentes : D. Barré, A. Karam, L. Olivier, F. Schooner, N. Moreau et G. Lessard
21 mars 2000	Départ des tests de germination pour les 2 espèces de plantes	8 tests au total (4 pour la moutarde et 4 pour le maïs, pour chacun des traitements)
3 avril 2000	Récolte des racines de maïs (3 échantillons) Prélèvement de 2 échantillons de sol provenant du fond des chaudières (EDTA-maïs et EDTA-moutarde)	Échantillonnage pour déterminer les concentrations de plomb et de cuivre dans les racines des plants de maïs traités avec de l'acide citrique ou le EDTA
4 avril 2000	Arrêt des tests de germination	Toutes les graines ont germé normalement et aucune différence significative n'a été notée entre les diverses conditions

5.2 FERTILISATION ET AMENDEMENT DES SOLS

Des engrais chimiques (azote, phosphore et potassium) ont été ajoutés au sol de façon homogène pour tous les échantillons. Les quantités de chacun de ces éléments ont été déterminées selon les recommandations de l'Association des fabricants d'engrais du Québec (1987) pour le maïs ensilage. Les mêmes doses ont été appliquées pour la moutarde.

Pour le cas de l'azote, on recommande l'ajout de 180 kg/ha de façon systématique, alors que pour le phosphore et le potassium, les ajouts se font en fonction des analyses de sol. Les doses calculées pour chacun de ces éléments sont fournies au tableau IV.

Tableau IV : Détermination des doses de fertilisants

Élément	Analyse initiale		Recommandation	
	mg/kg	mg/ha*	mg/ha*	mg/kg**
azote	10	27	180 (N)	66
phosphore	42	114	100 (P_2O_5)	37
potassium	177	480	90 (K_2O)	33

* Une profondeur moyenne de 0,17 mètre est utilisée pour fins de calcul.
** Une densité moyenne de 1,6 est utilisée pour transformer les volumes en poids.

En utilisant la profondeur généralement admise de 0,17 mètre comme moyenne utile et une densité moyenne de 1,6[1] pour le type de sol rencontré dans la cellule de Farnham, on obtient les facteurs de corrélation suivants pour déterminer les doses d'engrais à utiliser :

- 1 kg/ha[2] = 0,368 mg/kg
- 1 mg/kg = 2,720 kg/ha

Les engrais utilisés (le « 34-0-0 » pour l'azote, le « 0-20-0 » pour le phosphore et le « 0-0-50 » pour le potassium) ont été mélangés au sol simultanément au compost. Le volume total de sol utilisé était d'environ 400 litres, pour un poids estimé à 640 kg, auquel étaient ajoutés 20 kg (poids sec) de compost. Plus précisément, 30 kg de compost d'écorce contenant 35 % d'humidité ont été utilisés. En effet, les sols étant très pauvres en matière organique, la proportion de celle-ci a été portée à environ 3 % (p/p).

En se basant sur les recommandations établies au tableau IV, l'ajout des différents fertilisants s'établissait comme démontré au tableau V.

[1] Densité pour du sable moyennement tassé, selon la charte de W.F. McCollough (Geotechnical Gauge)
[2] 1 ha : 10 000 m^2 x 0,17 m = 1 700 m^3 x 1.6 x 1 000 = 2 720 000 kg

Tableau V : Quantités d'engrais utilisées

Type d'engrais	Quantité utilisée* (g)
34-0-0	128
0-20-0	122
0-0-50	44

* pour les 660 kg de sol

À la réunion tenue le 14 décembre 1999 aux serres de l'Université Laval, il a été décidé de procéder à un second ajout de fertilisants aux plants de mais, correspondant à la dose initiale. Cet ajout, destiné à accroître leur biomasse, a été fait le 4 janvier 2000.

5.3 DÉTERMINATION DES DOSES D'ACIDE CITRIQUE ET DE EDTA

Des essais préliminaires ont été effectués au laboratoire afin de vérifier l'effet de l'acide citrique sur les sols de Farnham. Le but de cet exercice était de déterminer les quantités d'acide citrique requises pour abaisser suffisamment le pH du sol et ainsi augmenter la solubilité des métaux, tout en respectant les plages de survie des plantes à l'étude. Les tests avaient également pour but de définir le volume de solution acidifiante requis pour répartir uniformément le liquide sans provoquer de lixiviation excessive hors de la matrice solide.

En considérant les contraintes de survie des plantes, la valeur cible de pH a été fixée à 5, et les différents essais en laboratoire ont montré qu'une dose de 0,8 g d'acide citrique était nécessaire pour abaisser de 6,1 à 4,93 le pH de 1 kg de sol (tableau VI). Ceci a permis d'établir la double dose d'acide citrique qui serait utilisée lors de l'essai en serre. La simple dose a par la suite été calculée en divisant par 2 la dose établie pour l'atteinte du pH de 5.

Enfin, le volume de solution à ajouter a été déterminé en vérifiant, en colonnes, la percolation d'un liquide à travers le sol spécifique de l'essai de phytorestauration. Différentes quantités d'eau ont donc été ajoutées à un volume prédéterminé de sol et l'essai qui a offert la meilleure distribution aqueuse dans la matrice, sans provoquer de lixiviation, a été retenu pour la réalisation des essais en serre.

Tableau VI : Doses d'acide citrique

Dose	Quantité d'acide citrique (g d'acide granulaire/kg sol)	pH
Aucune	0,0	6,1
Simple	0,4	5,35
Double	0,8	4,93

La dose de EDTA a été établie à 3,0 g/kg de sol en se basant sur des essais réalisés sur *Brassica juncea* par Ruby Beil (1998). Ces résultats sont fournis à l'annexe B. Tous les ajouts de chélates ont été faits sous forme dissoute, selon les doses présentées au tableau VII.

Tableau VII : Description des doses de chélates utilisées pour les essais

Chélate	Poids moléculaire (g)	Dose	Volume de solution ajouté à chacun des essais (l)	Molarité[1] de la solution (mol/l)
Acide citrique	210,14	Simple (0,4 g/kg de sol)	2,5	0,0252
			1,25	0,0504
		Double (0,8 g/kg de sol)	2,5	0,0504
			1,25	0,1008
EDTA	380,18	1 x 3 g/kg de sol	2,5	0,104
			1,25	0,208

[1] molarité : quantité de matière de soluté par unité de volume du solvant, exprimée en mole par litre

6 RÉSULTATS

6.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR LA CROISSANCE DES PLANTES

Les 2 espèces étudiées n'ont pas montré de signes de carence ou de réaction négative causées par la concentration élevée de plomb et de cuivre dans le sol. Malgré la très faible proportion de matières organiques (moins de 3 % après l'ajout de compost), les 2 espèces se sont très bien adaptées à des sols pauvres et sableux (annexe C, photos n^{os} 1 et 2).

L'ajout du EDTA a eu un effet létal sur les plants de moutarde et de maïs (annexe C, photos n^{os} 3 et 4). En ce qui concerne l'acide citrique, en dépit de l'ajout d'une seconde dose une semaine après l'addition de la première, aucun effet n'a pu être observé sur les 2 espèces.

La durée de croissance pour obtenir une biomasse importante a été d'environ 50 jours (±3 jours) dans le cas de *Brassica juncea* et d'environ 70 jours (±4 jours) dans le cas de *Zea mays*.

6.2 PHYTOEXTRACTION DE PLOMB ET DE CUIVRE

Les 31 échantillons de plants sont identifiés et décrits brièvement au tableau VIII. Les teneurs en plomb et en cuivre de tous ces échantillons sont présentées aux tableaux IX et X.

Tableau VIII : Identification des différents échantillons

Espèce	Partie de la plante	Nom de l'échantillon	Description
Brassica juncea	Aérienne	Témoin no 1	Échantillon 1/2* n'ayant reçu aucun chélate
		Témoin no 2	Échantillon 2/2 n'ayant reçu aucun chélate
		EDTA no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		EDTA no 2	Échantillon 1/2 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		Acide citrique (X1) no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X1) no 2	Échantillon 2/2 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 2	Échantillon 2/2 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
	Racinaire	Témoin no 1	Échantillon 1/2 n'ayant reçu aucun chélate
		Témoin no 2	Échantillon 2/2 n'ayant reçu aucun chélate
		EDTA no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		EDTA no 2	Échantillon 1/2 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		Acide citrique (X1) no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X1) no 2	Échantillon 2/2 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 1	Échantillon 1/2 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 2	Échantillon 2/2 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
Zea mays	Aérienne	Témoin no 1	Échantillon 1/3 n'ayant reçu aucun chélate
		Témoin no 2	Échantillon 2/3 n'ayant reçu aucun chélate
		Témoin no 3	Échantillon 3/3 n'ayant reçu aucun chélate
		EDTA no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		EDTA no 2	Échantillon 2/3 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		EDTA no 3	Échantillon 3/3 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		Acide citrique (X1) no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X1) no 2	Échantillon 2/3 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X1) no 3	Échantillon 3/3 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 2	Échantillon 2/3 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 3	Échantillon 3/3 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique
	Racinaire	EDTA no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu une dose (3 g/kg de sol) de EDTA
		Acide citrique (X1) no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu 2 doses simples (0,4 g/kg de sol) d'acide citrique
		Acide citrique (X2) no 1	Échantillon 1/3 ayant reçu 2 doses doubles (0,8 g/kg de sol) d'acide citrique

* Le numérateur indique le numéro de l'échantillon et le dénominateur, le nombre de duplicatas.

S/P/EC/9045/dans-tab.xls

Tableau IX : Cuivre et plomb mesurés dans *Brassica juncea*

	Poids sec (g)	Concentration		Extraction totale		Rendement*	
		Plomb mg/kg	Cuivre mg/kg	Plomb (mg)	Cuivre (mg)	Plomb (mg/kg sol)	Cuivre (mg/kg sol)
Partie aérienne							
Témoin no 1	92,40	20	16	1,85	1,48	0,06	0,05
Témoin no 2	117,30	16	20	1,88	2,35	0,06	0,07
Témoin (moyenne)	104,85	18	18	1,86	1,91	0,06	0,06
EDTA no 1	84,90	2700	300	229,23	25,47	7,16	0,80
EDTA no 2	57,40	2200	260	126,28	14,92	3,95	0,47
EDTA (moyenne)	71,15	2450	280	177,76	20,20	5,55	0,63
Acide citrique (X1) no 1	117,20	24	16	2,81	1,88	0,09	0,06
Acide citrique (X1) no 2	123,00	20	20	2,46	2,46	0,08	0,08
Acide citrique (X1) (moyenne)	120,10	22	18	2,64	2,17	0,08	0,07
Acide citrique (X2) no 1	114,10	130	64	14,83	7,30	0,46	0,23
Acide citrique (X2) no 2	83,80	210	80	17,60	6,70	0,55	0,21
Acide citrique (X2) (moyenne)	98,95	170	72	16,22	7,00	0,51	0,22
Racines							
Témoin no 1	11,40	180	16	2,05	0,18	0,06	0,01
Témoin no 2	11,20	170	16	1,90	0,18	0,06	0,01
Témoin (moyenne)	11,30	175	16	1,98	0,18	0,06	0,01
EDTA no1	10,50	110	28	1,16	0,29	0,04	0,01
EDTA no 2	11,00	140	24	1,54	0,26	0,05	0,01
EDTA (moyenne)	10,75	125	26	1,35	0,28	0,04	0,01
Acide citrique (X1) no 1	13,80	250	20	3,45	0,28	0,11	0,01
Acide citrique (X1) no 2	12,40	260	20	3,22	0,25	0,10	0,01
Acide citrique (X1) (moyenne)	13,10	255	20	3,34	0,26	0,10	0,01
Acide citrique (X2) no 1	15,00	520	28	7,80	0,42	0,24	0,01
Acide citrique (X2) no 2	10,30	280	28	2,88	0,29	0,09	0,01
Acide citrique (X2) (moyenne)	12,65	400	28	5,34	0,35	0,17	0,01

* Calcul établi sur l'estimation que chacune des chaudières de 22 litres contenait 32 kg de sol (poids sec). Le rendement est donc calculé en divisant le poids du métal (extraction totale) par 32.

S/P/EC/9045/Ident-tab.xls

Tableau X : Cuivre et plomb mesurés dans *Zea mays*

	Poids sec	Concentration		Extraction totale		Rendement*	
		Plomb	Cuivre	Plomb	Cuivre	Plomb	Cuivre
	(g)	mg/kg	mg/kg	(mg)	(mg)	(mg/kg sol)	(mg/kg sol)
Partie sérienne							
Témoin no 1	226,80	40	8	9,07	1,81	0,28	0,06
Témoin no 2	286,70	32	8	9,17	2,29	0,29	0,07
Témoin no 3	252,30	44	8	11,10	2,02	0,35	0,06
Témoin (moyenne)	255,27	39	8	9,78	2,04	0,31	0,06
EDTA no 1	149,70	280	52	41,92	7,78	1,31	0,24
EDTA no 2	174,10	600	88	104,46	15,32	3,26	0,48
EDTA no 3	130,10	880	92	114,49	11,97	3,58	0,37
EDTA (moyenne)	151,30	587	77	86,95	11,69	2,72	0,37
Acide citrique (X1) no 1	225,70	68	12	15,35	2,71	0,48	0,08
Acide citrique (X1) no 2	203,70	52	8	10,59	1,63	0,33	0,05
Acide citrique (X1) no 3	286,00	32	8	9,15	2,29	0,29	0,07
Acide citrique (X1) (moyenne)	238,47	51	9	11,70	2,21	0,37	0,07
Acide citrique (X2) no 1	212,70	68	12	14,46	2,55	0,45	0,08
Acide citrique (X2) no 2	246,00	40	8	9,84	1,97	0,31	0,06
Acide citrique (X2) no 3	267,20	16	8	4,28	2,14	0,13	0,07
Acide citrique (X2) (moyenne)	241,97	41	9	9,53	2,22	0,30	0,07
Racines							
EDTA no1	45,8	960	270	43,97	12,37	1,37	0,39
Acide citrique (X1) no 1	54,2	1600	350	86,72	18,97	2,71	0,59
Acide citrique (X2) no 1	50,2	2300	610	115,46	30,62	3,61	0,96

* Calcul établi sur l'estimation que chacune des chaudières de 22 litres contenait 32 kg de sol (poids sec). Le rendement est donc calculé en divisant le poids du métal (extraction totale) par 32.

S/P/EC/9045/Ident-tab.xls

7 DISCUSSION

7.1 CONSTATATIONS GÉNÉRALES

Selon les résultats initiaux des analyses de sol (tableau II), il faudrait abaisser d'au moins 200 mg/kg la teneur en plomb pour atteindre l'objectif de décontamination pour ce métal. En effet, la concentration actuelle se situe à environ 1 200 mg/kg alors que le critère « C » de la Politique du MENV pour le plomb est établi à 1 000 mg/kg. Il faudrait donc un rendement de décontamination (une quantité du contaminant extraite d'un kilogramme de sol (poids sec) à chaque récolte) d'environ 100 mg/kg de sol pour atteindre, en une saison, le critère de réhabilitation visé, en tenant compte du fait qu'il puisse être possible d'obtenir 2 récoltes annuellement.

À la lumière des résultats obtenus (tableaux IX et X), il semble que le meilleur rendement est obtenu avec *Brassica juncea* lorsque le EDTA (3,0 g/kg de sol) est utilisé comme agent chélatant. Le taux d'extraction de plomb correspond dans ce cas à 5,55 mg/kg de sol. Il faudrait donc 36 récoltes pour atteindre les objectifs visés, travaux qui s'étendraient alors sur 18 années, puisqu'il semble possible d'obtenir 2 récoltes annuellement avec la moutarde.

Les analyses faites sur les racines de maïs montrent que l'acide citrique (dose de 1,6 g/kg de sol) a permis un rendement de décontamination de 3,61 mg/kg de sol. Ces résultats, combinés à ce qui est obtenu dans la partie aérienne avec le EDTA, laissent entrevoir la possibilité d'appliquer les 2 traitements avant la récolte (d'abord l'acide citrique, puis le EDTA), et ce, dans le but d'obtenir le maximum de rendement pour chaque récolte de maïs. Cette technique permettrait, en récoltant le maïs en entier (les racines et la partie aérienne), d'obtenir un rendement de 6,33 mg/kg de sol. Dans ce cas, le traitement nécessiterait 32 récoltes. Cependant, la croissance du maïs étant plus lente que celle de la moutarde, cette option ne permettrait pas d'en obtenir annuellement 2 récoltes. La réhabilitation du sol serait, par conséquent, beaucoup plus longue qu'avec la moutarde.

Les essais ont aussi permis d'observer un phénomène de lixiviation des métaux des couches supérieures vers les couches inférieures du sol après l'ajout du EDTA (voir les résultats du tableau II). Il a été observé avec les 2 espèces végétales. La décontamination chimique des sols de Farnham pourrait donc être envisagée au moyen du EDTA si le coût d'utilisation de cet agent chélatant s'avérait économique. Cet aspect sera abordé à la section 7.2.

En résumé, on peut retenir ceci des essais :

- les plants cultivés dans les sols traités avec les agents chélateurs ont prélevé beaucoup plus de plomb et de cuivre que les plants cultivés dans le sol témoin, d'où la pertinence d'ajouter des agents chélateurs au sol;
- la moutarde a accumulé des concentrations élevées de plomb provenant du sol traité avec le EDTA. Cette concentration dépassait le niveau minimal d'accumulation du plomb par les plantes classifiées comme hyperaccumulatrices (ce niveau est établi à 1 000 mg/kg de matière sèche), d'où le choix approprié de la moutarde indienne comme plante test;
- les quantités prélevées par les plantes ne sont pas suffisamment élevées pour réduire la concentration du plomb et du cuivre dans le sol après récolte à un niveau acceptable (inférieur au niveau « C »), et ce, dans un délai court et de façon économique (voir section 7.2);
- les résultats indiquent que l'extraction d'une quantité très élevée de plomb du sol (au-delà de 200 mg de plomb par kg de sol) par les 2 plantes aurait nécessité l'ajout d'une grande quantité d'agent chélateur et de multiples périodes de croissance;
- avec l'ajout du EDTA, il se produit un effet de lixiviation des métaux vers les couches inférieures du sol. Ce phénomène pourrait être mis à profit pour décontaminer les sols par lessivage chimique, si cette avenue s'avérait économiquement viable.

7.2 ÉVALUATION DU COÛT DU TRAITEMENT

Tout d'abord, il a été constaté à la section précédente que la phytorestauration ne semble pas une méthode appropriée pour la décontamination des sols de la cellule de Farnham. Toutefois, il est possible d'évaluer les coûts d'application de la technologie à ce cas particulier. L'option la plus intéressante serait d'utiliser la moutarde indienne, qui permettrait 2 récoltes annuelles d'environ 1,5 tonne (poids sec de la partie aérienne) sur la surface de 0,2 hectare de la cellule.

Le EDTA (au coût de 8,19 $/kg) qu'il faut ajouter aux 2 490 tonnes (1 556 m^3) de sol à traiter avant chaque récolte à raison de 3 kg/t de sol, coûterait 122 400 $ annuellement..

Les coûts afférents aux différentes opérations de terrain s'évaluent comme indiqué au tableau XI.

Tableau XI : Coûts annuels de traitement avec 2 récoltes de moutarde

Activité	Coût* ($ CA)
Préparation du terrain	800
Engrais (azote, phosphore, potassium)	1 600
Ensemencement (incluant les semences)	800
Suivi (incluant l'arrosage)	1 600
EDTA	122 400
Récolte	1 200
Séchage	600
Disposition (+ transport)	400
TOTAL	**129 400 $**

* Chacun des coûts inclut la gestion.

Selon les évaluations présentées ci-dessus, il faudrait multiplier par 18 le coût annuel du tableau XI pour diminuer la concentration en plomb des sols au-dessous du niveau « C » de la Politique du MENV. Le coût total du traitement par phytorestauration des sols de la cellule de Farnham s'avère donc nettement prohibitif en comparaison avec d'autres options possibles. Par exemple, l'enfouissement des sols dans un lieu approuvé coûterait environ 100 000 $ et constituerait un mode d'élimination définitif.

8 RECOMMANDATIONS

Le coût du EDTA à lui seul implique un déboursé de 25 $ la tonne de sol à traiter, et son application doit être répétée à chaque récolte, soit 2 fois l'an dans le cas de la moutarde. Ainsi, même s'il était possible de se procurer du EDTA à un prix plus abordable, la phytorestauration ne semble pas constituer, à elle seule, une avenue réaliste pour la réhabilitation des sols de Farnham. Il pourrait être envisageable de combiner cette technologie avec une autre, par exemple, en tirant profit du fait que les sols sont confinés dans une cellule étanche et en récupérant le lixiviat et les métaux qui y sont solubilisés.

Les coûts et le temps de traitement s'avéreraient très élevés comparativement à d'autres moyens de réhabilitation (par exemple, l'enfouissement sécuritaire), ce qui défavorise grandement la phytorestauration par rapport aux autres technologies usuelles et nous empêchent de la recommander comme approche unique pour décontaminer les sols de la cellule de Farnham.

9 RÉFÉRENCES CITÉES

AFEQ, 1987. *Guide de fertilisation*, Association des fabricants d'engrais du Québec, Montréal, 133 p.

Beil, R.S., A.M. Pretrovic., T.H. Whitlow, L.V. Kochian and W.A. Norvel, 1998. *Phytoremediation of Lead Contaminated Soils with Perennial Plants*, 14th Annual Conference on Contaminated Soils, Octsober 1998, University of Massachusetts at Amherst, MA.

Huang J.W., J. Chen, and S.D. Cunningham, 1997a. *Phytoextraction of Lead from Contaminated Soils.* Dans Phytoremediation of Soil and Water Contaminants. ACS Symposium Series 664, pp. 283-298.

Huang, J.W., J. Chen, W.R. Berti and S.D. Cunningham, 1997b. *Phytoremediation of Lead-Contaminated Soils : Role of Synthetic Chelates in Lead Phytoextraction.* Environ. Sci. Technol. 31 :800-805.

ITRC (The Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group Phytoremediation Work Team), 1999. *Phytoremediation Decision Tree*. Net : http://www.itrcweb.org

McIntyre, T., 1999. Development of a Worldwide Data Base on Metal Tolerant and Metal Accumulating Plants for Contaminated Site Remediation. Dans Compte rendu : Colloque technique de phytorémédiation. Environnement Canada, Calgary, Alberta, pp. 33-59.

Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1999. *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*, ISBN 2-551-18001-5, Envirodoq EN980478, 124 p.

Olivier, L., A. Karam et Y. Pouliot, 1999. *Using Terrestrial Plant Species to Extract Zinc and Manganese from Contaminated Sediment.* Compte rendu : Colloque technique de phytorémédiation, 31 mai et 1er juin 1999, Calgary, Alberta. pp. 59-68.

Sanexen, 1998, *Ségrégation physique des buttes d'arrêt de l'ancien champ de tir*, secteur d'entraînement de l'Estrie, Farnham, Rapport final.

ANNEXE A

Certificats d'analyse

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT
9561
Version
1

DATE DU RAPPORT: 00-03-10

Échantillon	V/Référence	Date Écht.	pH	Cuivre mg/kg Cu	Plomb mg/kg Pb
118962					
S-CU	MA-TE	00-03-06		160	
S-PB	MA-TE	00-03-06			1300
S-PH	MA-TE	00-03-06	5.8		
118963					
S-CU	MA-ED	00-03-06		80	
S-PB	MA-ED	00-03-06			280
S-PH	MA-ED	00-03-06	7.0		
118964					
S-CU	MA-A1	00-03-06		120	
S-PB	MA-A1	00-03-06			800
S-PH	MA-A1	00-03-06	5.3		
118965					
S-CU	MA-A2	00-03-06		130	
S-PB	MA-A2	00-03-06			760
S-PH	MA-A2	00-03-06	5.4		
118966					
S-CU	MO-TE	00-03-06		170	
S-PB	MO-TE	00-03-06			1000
S-PH	MO-TE	00-03-06	6.4		
118967					
S-CU	MO-ED	00-03-06		100	
S-PB	MO-ED	00-03-06			360
S-PH	MO-ED	00-03-06	8.0		
118968					
S-CU	MO-A1	00-03-06		140	
S-PB	MO-A1	00-03-06			880

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

[redacted]

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT
9561
Version
1

DATE DU RAPPORT: 00-03-10

Échantillon	V/Référence	Date Écht.	pH	Cuivre mg/kg Cu	Plomb mg/kg Pb
S-PH	MO-A1	00-03-06	5.8		
118969					
S-CU	MO-A2	00-03-06		140	
S-PB	MO-A2	00-03-06			960
S-PH	MO-A2	00-03-06	5.2		

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT
9576
Version
1

DATE DU RAPPORT: 00-03-13

Échantillon	V/Référence	Date Écht.	Plomb mg/kg Pb	Cuivre mg/kg Cu
118808				
S-CU	Brassica(A) T-1	00-03-02		16
S-PB	Brassica(A) T-1	00-03-02	20	
118809				
S-CU	Brassica(A) T-2	00-03-02		20
S-PB	Brassica(A) T-2	00-03-02	16	
118810				
S-CU	Brassica(A) ACX1-1	00-03-02		16
S-PB	Brassica(A) ACX1-1	00-03-02	24	
118831				
S-CU	Brassica(A) ACX1-2	00-03-02		20
S-PB	Brassica(A) ACX1-2	00-03-02	20	
118832				
S-CU	Brassica(A) ACX2-1	00-03-02		64
S-PB	Brassica(A) ACX2-1	00-03-02	130	
118833				
S-CU	Brassica(A) ACX2-2	00-03-02		80
S-PB	Brassica(A) ACX2-2	00-03-02	210	
118834				
S-CU	Brassica(A) EDTA-1	00-03-02		300
S-PB	Brassica(A) EDTA-1	00-03-02	2700	
118835				
S-CU	Brassica(A) EDTA-2	00-03-02		260
S-PB	Brassica(A) EDTA-2	00-03-02	2200	
118836				
S-CU	Brassica(S) T-1	00-03-02		16

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT
9576
Version
1

DATE DU RAPPORT: 00-03-13

Échantillon	V/Référence	Date Échl.	Plomb mg/kg Pb	Cuivre mg/kg Cu
S-PB	Brassica(S) T-1	00-03-02	180	
118837				
S-CU	Brassica(S) T-2	00-03-02		16
S-PB	Brassica(S) T-2	00-03-02	170	
118838				
S-CU	Brassica(S) ACX1-1	00-03-02		20
S-PB	Brassica(S) ACX1-1	00-03-02	250	
118839				
S-CU	Brassica(S) ACX1-2	00-03-02		20
S-PB	Brassica(S) ACX1-2	00-03-02	260	
118840				
S-CU	Brassica(S) ACX2-1	00-03-02		28
S-PB	Brassica(S) ACX2-1	00-03-02	520	
118841				
S-CU	Brassica(S) ACX2-2	00-03-02		28
S-PB	Brassica(S) ACX2-2	00-03-02	280	
118842				
S-CU	Brassica(S) EDTA-1	00-03-02		28
S-PB	Brassica(S) EDTA-1	00-03-02	110	
118843				
S-CU	Brassica(S) EDTA-2	00-03-02		24
S-PB	Brassica(S) EDTA-2	00-03-02	140	
118844				
S-CU	MAIS-A1-1	00-03-02		12
S-PB	MAIS-A1-1	00-03-02	68	
118845				

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointe-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT 9576
Version 1

DATE DU RAPPORT: 00-03-13

Échantillon	V/Référence	Date Écht.	Plomb mg/kg Pb	Cuivre mg/kg Cu
S-CU	MAIS-A1-2	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-A1-2	00-03-02	52	
118846				
S-CU	MAIS-A1-3	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-A1-3	00-03-02	32	
118847				
S-CU	MAIS-A2-1	00-03-02		12
S-PB	MAIS-A2-1	00-03-02	68	
118848				
S-CU	MAIS-A2-2	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-A2-2	00-03-02	40	
118849				
S-CU	MAIS-A2-3	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-A2-3	00-03-02	16	
118850				
S-CU	MAIS-EDTA-1	00-03-02		52
S-PB	MAIS-EDTA-1	00-03-02	280	
118851				
S-CU	MAIS-EDTA-2	00-03-02		88
S-PB	MAIS-EDTA-2	00-03-02	600	
118852				
S-CU	MAIS-EDTA-3	00-03-02		92
S-PB	MAIS-EDTA-3	00-03-02	880	
118853				
S-CU	MAIS-TE-1	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-TE-1	00-03-02	40	

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

CHIMISTE
Normand Fleury
No 123
QUÉBEC

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

[redacted]

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointe-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT 9576
Version 1

DATE DU RAPPORT: 00-03-13

Échantillon	V/Référence	Date Écht.	Plomb mg/kg Pb	Cuivre mg/kg Cu
118854				
S-CU	MAIS-TE-2	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-TE-2	00-03-02	32	
118855				
S-CU	MAIS-TE-3	00-03-02		8.0
S-PB	MAIS-TE-3	00-03-02	44	

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

CHIMISTE
NORMAND FLEURY
142 123
UQAM

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT 9706
Version 1

DATE DU RAPPORT: 00-04-10

Échantillon	V/Référence	Date Échl.	%Matière sèche	Phosphate assim.	Plomb	Cuivre
			%	mg/kg P	mg/kg Pb	mg/kg Cu
120441						
S-CU	Sol Maïs-EDTA	00-04-03				120
S-MS	Sol Maïs-EDTA	00-04-03	84			
S-PB	Sol Maïs-EDTA	00-04-03			640	
S-PO4	Sol Maïs-EDTA	00-04-03		150		
120442						
S-CU	Sol Moutarde-EDTA	00-04-03				150
S-MS	Sol Moutarde-EDTA	00-04-03	81			
S-PB	Sol Moutarde-EDTA	00-04-03			1200	
S-PO4	Sol Moutarde-EDTA	00-04-03		210		

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

[redacted]

Division
Laboratoire
Analytique

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

ISO/CEI 25
Système Qualité
Conforme

No PROJET: EC9045-001-101 Environnement Canada, Phytorestauration

No CERTIFICAT 9717
Version 1

DATE DU RAPPORT: 00-04-12

Échantillon	V/Référence	Date Échl.	Plomb mg/kg Pb	Cuivre mg/kg Cu
120630				
S-CU	Racine-maïs-ALX1	00-04-06		350
S-PB	Racine-maïs-ALX1	00-04-06	1600	
120631				
S-CU	Racine-maïs-ALX2	00-04-06		610
S-PB	Racine-maïs-ALX2	00-04-06	2300	
120632				
S-CU	Racine-maïs-EDTA	00-04-06		270
S-PB	Racine-maïs-EDTA	00-04-06	960	

Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

CONFIDENTIEL

Normand Fleury, M.Sc. Chimiste

[redacted]

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3563

12 672, boul. Industriel
Pointes-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

CERTIFICAT D'ANALYSE

ENVIROLAB

Division de Roche ltée
Groupe-conseil
1818, rte de l'Aéroport
Sainte-Foy (Québec)
Canada, G2G 2P8
Téléphone:
(418) 871-8722
Télécopieur:
(418) 871-9556

Date d'émission du rapport: 00/04/07

Demande d'analyse : 059486

Sujet : ANALYSE DE SOL

Client : BIOGENIE SRDC INC.
Responsable : M.NORMAND FLEURY
Prélevé par : VOTRE REPRESENTANT

Votre référence : EC9045-001-101-03317

Echantillon(s) recu(s) le : 00/04/06

		No Labo:	219213	219214		
		V/Réf:	SOL MAIS-EDTA 120441	SOL MOU TARDE ED TA 120442		
		D.Pr.:	ND	ND		
PARAMETRE	Unité	H.Pr.:				
Azote disponible soluble	mg/kg N		<3	9		

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, même en entier, sans une permission écrite d'Envirolab

Approuvé par: BERNARD MONTMINY, Chimiste M.Sc.

CHIMISTE Bernard Montminy 88-044 QUÉBEC

CERTIFIÉ ISO 9002

ISO GUIDE 25 SYSTÈME QUALITÉ CONFORME

ANNEXE B

Résultats de Ruby Beil (1998)

Table 8. Averages and standard deviations of lead in soil, tissue, and leachate and the percent removed from soil and accumulated in the whole plant for each species/EDTA treatment.

Treatment Spp./[EDTA] g EDTA kg^{-1} soil	Initial Soil Pb mg	Leaf [Pb] at harvest mg kg^{-1}	Total Plant Pb mg	Total Leachate Pb mg	%Removed by whole plant %
Mustard---0.0	9748±1671	4.6 ±1.4	1.4± 0.1	0.0±0.0	0.01
Fescue---0.0	10523±463	3.9 ±0.3	3.3± 0.9	0.0±0.0	0.03
Maple---0.0	9823±1383	1.8 ±0.3	0.6± 0.0	0.3±0.4	0.01
Mustard---1.0	9525±730	59.2 ±5.6	6.9± 4.1	0.0±0.0	0.10
Fescue---1.0	9231±2438	131.5 ±5.2	4.4± 0.3	0.0±0.0	0.05
Maple---1.0	10223±625	25.1 ±4.3	8.3± 8.0	16.4±25.1	0.08
Mustard---2.0	10538±198	850.7±235	28.9±10.8	0.0±0.0	0.27
Fescue---2.0	10491±1646	220.4±37.3	59.3± 0.5	0.0±0.0	0.57
Maple---2.0	10333±832	124.1±9.0	6.5± 1.5	9.5± 3.9	0.06
Mustard---3.0	10020±604	1073.5±252	72.0±15.3	0.0±0.0	0.72
Fescue---3.0	9679± 87	315.9±54.3	29.4± 1.8	21.1±55.2	0.30
Maple---3.0	9392±282	78.5 ±68.8	3.2± 1.0	21.4± 9.4	0.23
Mustard---5.0	10457±490	1307.7±174	61.1± 4.7	0.0±0.0	0.59
Fescue---5.0	10351±424	273.4±110	29.2± 9.1	0.0±0.0	0.28
Maple---5.0	10297±1141	90.6 ±56.0	3.0± 0.7	7.4±12.6	0.03
Mustard---8.0	10602±961	1316.2±183	68.2± 5.7	0.0±0.0	0.64
Fescue---8.0	9330±2171	433.6±68.7	35.9± 4.1	0.0±0.0	0.39
Maple---8.0	8973±1422	121.6±52.3	6.0± 1.1	32.0±20.7	0.07
Mustard---12.0	10938±5085	1193.9±138	80.1±10.3	0.0±0.0	0.73
Fescue---12.0	10442±609	402.1 ±26.5	35.9± 1.4	54.1±93.8	0.52
Maple---12.0	10635±2235	175.4 ±145	4.0± 0.4	10.7±3.4	0.10

ANNEXE C

Montage photographique

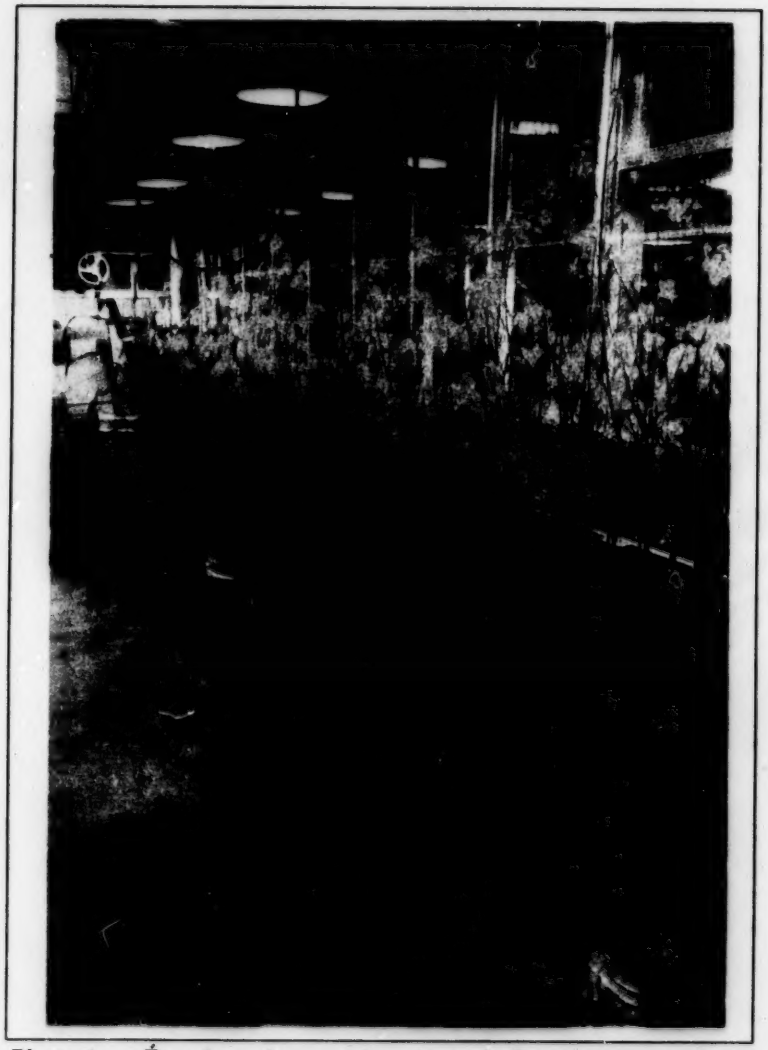

Photo 1 : État de croissance des plants de *Brassica juncea* lors du premier ajout de chélates (5 janvier 2000)

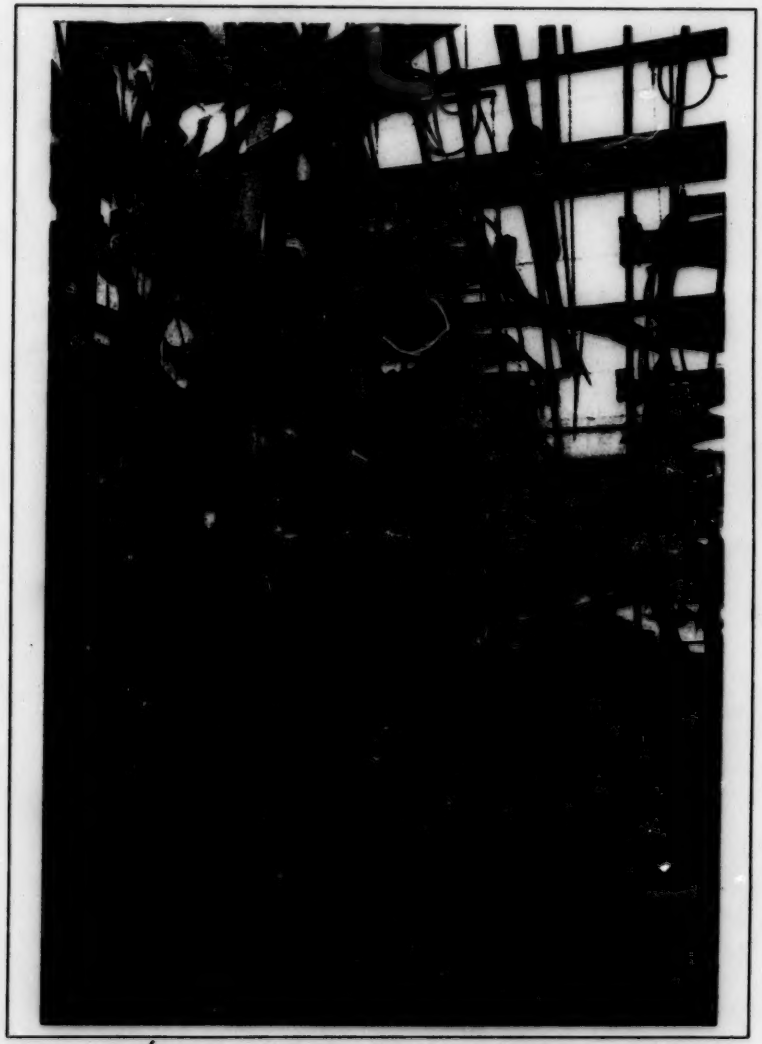

Photo 2 : État de croissance des plants de *Zea mays* lors du premier ajout de chélates (21 janvier 2000)

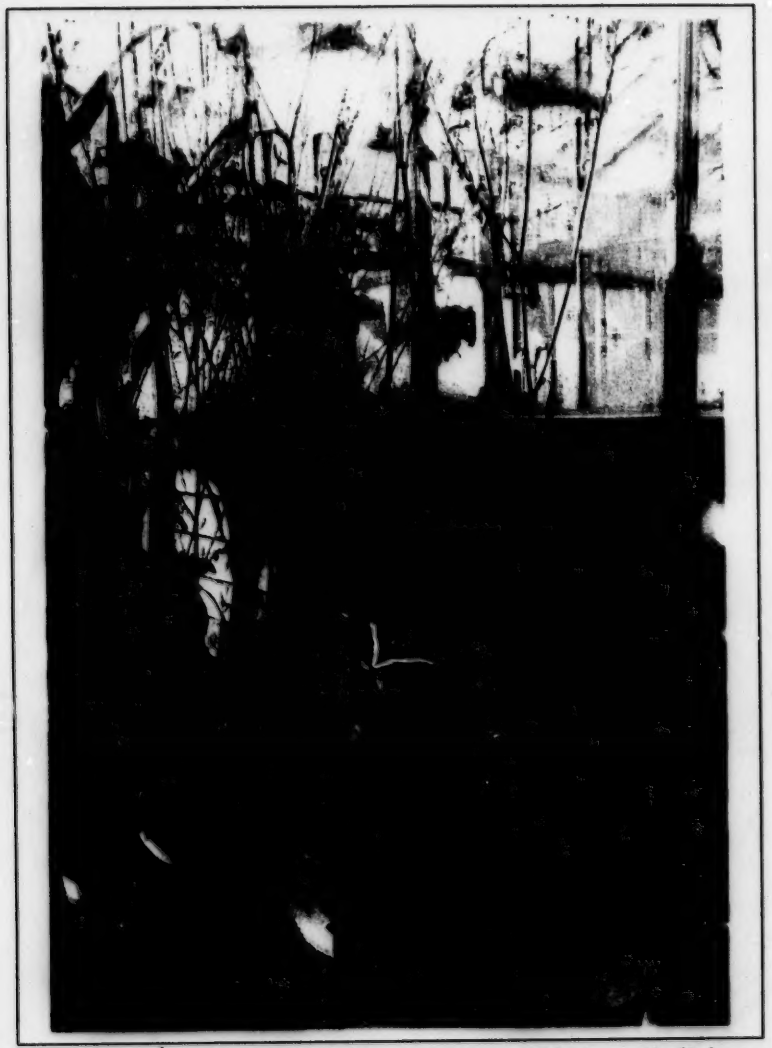

Photo 3 : État des plants de *Brassica juncea* 5 jours après l'ajout de EDTA (10 janvier 2000)

Photo 4 : État des plants de *Zea mays* 4 jours après l'ajout de EOTA (25 janvier 2000)